

О ПРИРОДЕ ПЕРИОДИЧЕСКОЙ НЕСТАЦИОНАРНОСТИ ШУМОВ В АВТОДИННЫХ СВЧ ГЕНЕРАТОРАХ

В.Я. Носков, К.А. Игнатков

Екатеринбург, Уральский федеральный университет, noskov@oko-ek.ru

ON THE NATURE OF NOISE PERIODICAL NONSTATIONARITY IN AUTODYNE MICROWAVE OSCILLATORS

V.Ya. Noskov, K.A. Ignatkov

При решении проблем применения автодинов в системах ближней радиолокации, выбора типа генератора и способа обработки сигналов необходимы знания об их шумовых параметрах и характеристиках, поскольку они определяют энергетический потенциал системы, как радиолокатора, дальность его действия, надёжность обнаружения цели, точность измерения параметров и пр. Поэтому исследования шумовых характеристик автодинов посвящено большое число работ. В большей части этих работ анализ шумов в автодине проведен так же, как в обычном генераторе, без учёта влияния отражённого от цели излучения, полагая, что эти два процесса, формирования автодинного отклика и прохождение шумов, в системе независимы [1]. Однако результаты экспериментально показанной зависимости уровня шума автодинного сигнала от фазы коэффициента отражения, то есть от расстояния до отражающего объекта [2] вызывают сомнения в корректности «линейной» модели автодина.

Данное явление, получившее лишь феноменологическое объяснение, требует своего теоретического обоснования, а направление исследований шумовых характеристик автодинов – своего дальнейшего развития. В настоящей работе, выполнен квазистатистический анализ прохождения шумов в автодинном генераторе, находящемся под воздействием собственного отражённого излучения и показана природа периодической нестационарности шумов выходного сигнала.

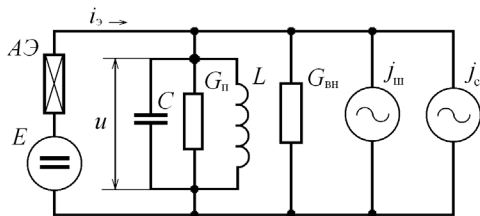


Рис. 1. Эквивалентная схема одноконтурного автодинного генератора

Эквивалентная схема простейшего одноконтурного автодинного генератора с активным элементом (АЭ) N -типа представлена на рис. 1. На этой схеме параллельным соединением индуктивности L , ёмкости C и проводимости потерь G_π отражены эквивалентные параметры резонатора с собственной частотой $\omega_c = (LC)^{1/2}$, а проводимостью $G_{вн}$ – внешняя нагрузка генератора. Параллельно резонатору подключены эквивалентные генераторы мгновенного тока внутренних шумов генератора $j_\text{ш}$ и воздействия собственного отражённого от объекта излучения $j_\text{с}$.

При этом шум, полагая, характеризуется среднеквадратическим отклонением $\langle j_\text{ш}^2 \rangle$ при нулевом среднем значении и равномерным спектральным распределением.

Под действием источника напряжения смещения E активный элемент АЭ выводится на участок с падающей вольт-амперной характеристикой. При условии выполнения баланса амплитуд и фаз в схеме под действием тока i_0 АЭ возникает генерация незатухающих колебаний u . При условии достаточно высокой нагруженной добротности $Q_\text{н} = \omega_c C / G$, где $G = G_\pi + G_{вн}$, в схеме устанавливаются колебания, близкие к гармоническим:

$$u \equiv u(t) = \text{Re}[A \exp(j(\omega_0 t + \varphi))], \quad (1)$$

где $A \equiv A(t)$ и $\varphi \equiv \varphi(t)$ – медленно меняющиеся за период $T = 2\pi / \omega_0$ амплитуда и фаза автоколебаний. Согласно закону Кирхгофа для цепи, приведенной на рис. 1, имеем

$$\text{Re}[\dot{U} \dot{Y}_s] + \text{Re}[\dot{U} (\dot{Y}_\text{к} + G_{вн})] = j_\text{ш}(t) + j_\text{с}(t), \quad (2)$$

где $\dot{Y}_s = G_s + jB_s$, $G_s \equiv G_s(A, \omega)$, $B_s \equiv B_s(A, \omega)$ – комплексная, резистивная и реактивная проводимости АЭ соответственно; $\dot{Y}_\text{к} = G(1 + j2Q_\text{н}v_c)$, $v_c = (\omega - \omega_c) / \omega_c$ – комплексная проводимость колебательной системы (КС) и её обобщённая расстройка; ω – текущая частота.

Применив к анализу уравнения (2) с учётом выражения (1) метод Курокавы [3] и выполнив линеаризацию образовавшейся системы укороченных уравнений в окрестности режима стационарных колебаний $A = A_0$, $\omega = \omega_0$, после ряда преобразований получим систему дифференциальных уравнений для относительных вариаций амплитуды $a_1 = (A - A_0) / A_0$, частоты $\chi = (\omega - \omega_0) / \omega_0$ колебаний генератора и мгновенного набега фазы $\delta(t, \tau)$ отражённого излучения:

$$(Q_n / \omega_c)(da_1/dt) + \alpha_{11}a_1 + \varepsilon_{11}\chi = \Gamma(t, \tau)\eta\cos\delta(t, \tau) + a_c(t), \quad (3)$$

$$\beta_{11}a_1 + Q_n\chi = -\Gamma(t, \tau)\eta\sin\delta(t, \tau) - a_s(t), \quad (4)$$

$$\delta(t, \tau) = \Psi(t) - \Psi(t, \tau), \quad (5)$$

где α_{11} – приведенная крутизна инкремента генератора, обуславливающая степень регенерации и прочность его предельного цикла; $\varepsilon_{11} = \varepsilon_{kc} + \varepsilon_s$ – параметр, определяющий неизодромность генератора, иными словами, учитывающий влияние вариаций частоты на амплитуду колебаний через изменения параметров резистивной проводимости колебательной системы ε_{kc} и электронную проводимость АЭ ε_s ; β_{11} – параметр, определяющий неизохронность генератора; $\eta = Q_n / Q_{вн}$ – КПД колебательной системы, Q_n , $Q_{вн}$ – её нагруженная и внешняя добротности; ω_0 – частота стационарных колебаний автономного генератора; $\Gamma(t, \tau)$, $\Psi(t)$, $\Psi(t, \tau)$ – полная фаза колебаний генератора в текущий момент времени t и из предыстории $t - \tau$; τ – полное время распространения отражённого излучения; $a_c(t)$, $a_s(t)$ – синфазная и ортогональная составляющие нормированного внутреннего шума генератора:

$$i_c(t) = \frac{1}{2\pi A_0 G} \int_{\omega_0 t - 2\pi}^{\omega_0 t} i_{ш}(t) \cos(\omega_0 t + \varphi) d\omega_0 t, \quad i_s(t) = \frac{1}{2\pi A_0 G} \int_{\omega_0 t - 2\pi}^{\omega_0 t} i_{ш}(t) \sin(\omega_0 t + \varphi) d\omega_0 t. \quad (6)$$

Дальнейший анализ системы (3) – (4) выполним в квазистатическом приближении, полагая производную в (3) равной нулю и $\Gamma(t, \tau) = \Gamma$. Решение этой системы имеет вид:

$$a_{1н} = (a_1 / a_{m1}) = [a_c(t) + \rho a_s(t)] / a_{c/ш} + \cos[\delta(t, \tau) - \psi_1], \quad (7)$$

$$\chi_n = (\chi / \chi_m) = -[a_s(t) + \gamma a_c(t)] / \chi_{c/ш} - \sin[\delta(t, \tau) + \theta], \quad (8)$$

$$\delta(t, \tau) = \omega_0 \tau - p_{ш} - p_a \sin[\delta(t, \tau) + \theta], \quad (9)$$

где $a_{m1} = \Gamma \eta K_a$, $\chi_m = \Gamma \eta L_a$ – амплитудные значения автодинного отклика; K_a , L_a – коэффициенты автодинного усиления и девиации частоты соответственно: $K_a = \eta \sqrt{1 + \rho^2} / \alpha_{11} (1 - \gamma \rho)$, $L_a = \eta \sqrt{1 + \gamma^2} / Q_n (1 - \gamma \rho)$; $a_{c/ш} = \Gamma \sqrt{1 + \rho^2}$, $\chi_{c/ш} = \Gamma \sqrt{1 + \gamma^2}$ – коэффициенты, характеризующие отношение сигнал/шум автодинных изменений амплитуды и частоты; $p_a = \Gamma \eta \omega_0 L_a \tau$, $p_{ш} = \omega_0 L_a \tau [a_s(t) + \gamma a_c(t)] / \sqrt{1 + \gamma^2}$ – индексы фазовой модуляции, обусловленные действием отражённого излучения (p_a) (так называемый параметр искажений) и шумов ($p_{ш}$); $\psi_1 = \arctg \rho$, $\theta = \arctg \gamma$ – углы относительных фазовых смещений автодинных изменений $a_{1н}$ и χ_n соответственно; $\gamma = \beta_{11} / \alpha_{11}$, $\rho = \varepsilon_{11} / Q_n$ – коэффициенты неизохронности и неизодромности генератора.

При выполнении условий $p_{ш} \ll 1$ и $p_a < 1$ решение трансцендентного уравнения (9) методом последовательных приближений запишем в виде:

$$\delta(t, \tau) = [\omega_0 \tau]_{(0)} - p_{ш} - p_a \sin\{[\omega_0 \tau]_{(1)} - p_{ш} + \theta - p_a \sin\{[\omega_0 \tau]_{(2)} - p_{ш} + \theta - \dots - p_a \sin\{[\omega_0 \tau]_{(n-1)} - p_{ш} + \theta - p_a \sin\{[\omega_0 \tau]_{(n)} - p_{ш} + \theta\} \dots\}\}, \quad (10)$$

где индексы около квадратных скобок означают порядок приближения.

Дальнейший анализ выражений (7) – (9) с учётом (10) проведём численным методом с использованием математической программы Matchcad, в состав которой встроена подпрограмма, обеспечивающая возможность моделирования ортогональных составляющих $a_c(t)$ и $a_s(t)$ нормального случайного процесса. На рис. 2 представлены результаты расчетов фазовой $\delta_n(\tau_n)$ (ФХА), амплитудной $a_{1n}(\tau_n)$, частотной $\chi_n(\tau_n)$ и соответствующих им зависимостей модуля флуктуационных составляющих фазы $\delta_{ш}$ и параметров колебаний $a_{ш}$ и $\chi_{ш}$ от нормированного времени $\tau_n = 2\pi/\omega_0$ для неизохронного и неизодромного генератора $\gamma \neq \rho \neq 0$.

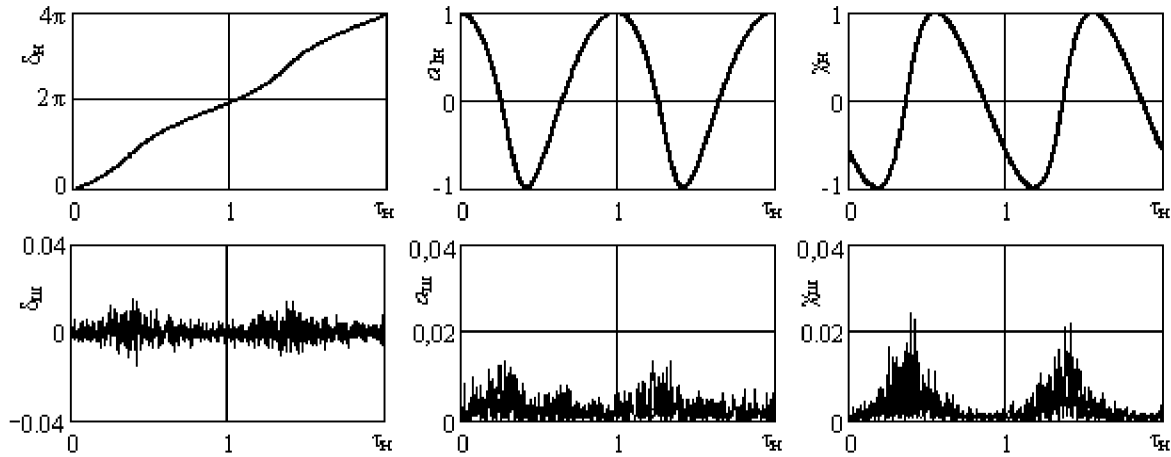


Рис. 2. Нормированные фазовая δ_n , амплитудная a_{1n} и частотная χ_n и соответствующие им шумовые характеристики, рассчитанные при $p_a = 0,4$; $a_{с/ш} = \chi_{с/ш} = 20$; $\gamma = 1$, $\rho = -0,25$.

Из сравнения полученных расчётных характеристик с известными экспериментальными результатами [2] видно их хорошее качественное совпадение.

Расчёты характеристик при $\gamma = \rho = 0$ и $p_a = 0$ показали, что нестационарность шумов у изохронных и изодромных генераторов наблюдается только у частотной составляющей. Амплитудная составляющая из-за линейности ФХА остаётся равномерной при изменении положения отражателя, хотя её уровень «приподнят» из-за переноса частотных шумов в амплитудные. Отсюда следует, что периодическая нестационарность шумов автодинов при перемещении отражателя обусловлена, прежде всего, модуляцией эквивалентной нагруженной $Q_{эн}$ добротности колебательной системы под воздействием отражённого излучения: $1/Q_{эн} = (1/Q_n)(1 - 2\Gamma\eta \cos \delta)$.

В случае $0 < p_a < 1$ нелинейность фазовой характеристики $\delta(t, \tau)$ вызывает неравномерный «перенос» частотных флуктуаций $\chi_{ш}$, как в фазовые $\delta_{ш}$, так и в амплитудные $a_{ш}$ флуктуации.

В случае неизохронного и неизодромного генератора взаимные преобразования и переносы флуктуаций происходят не только за счёт внутренних причин ($\gamma \neq \rho \neq 0$) генератора, но и за счёт нелинейности ФАХ $\delta(t, \tau)$ при условии $0 < p_a < 1$.

Данные особенности формирования сигналов и преобразования шумов необходимо учитывать при обработке сигналов в автодинных системах.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в соответствии с постановлением Правительства №218 от 09.04.2010г.

Литература

1. Хотунцев Ю. Л., Тамарчак Д. Я. Синхронизированные генераторы и автодины на полупроводниковых приборах. М.: Радио и связь. 1982.
2. Кузнецов О.В., Струков И.А. Нагрузочно-шумовые характеристики автодина на ЛПД // Радиотехника. 1980. Т. 35, № 8. С. 56–58.
3. Kurokawa K. Injection Locking of Microwave Solid-State Oscillators // Proceedings of the IEEE. 1973. Vol. 61, № 10. P. 1386–1410.